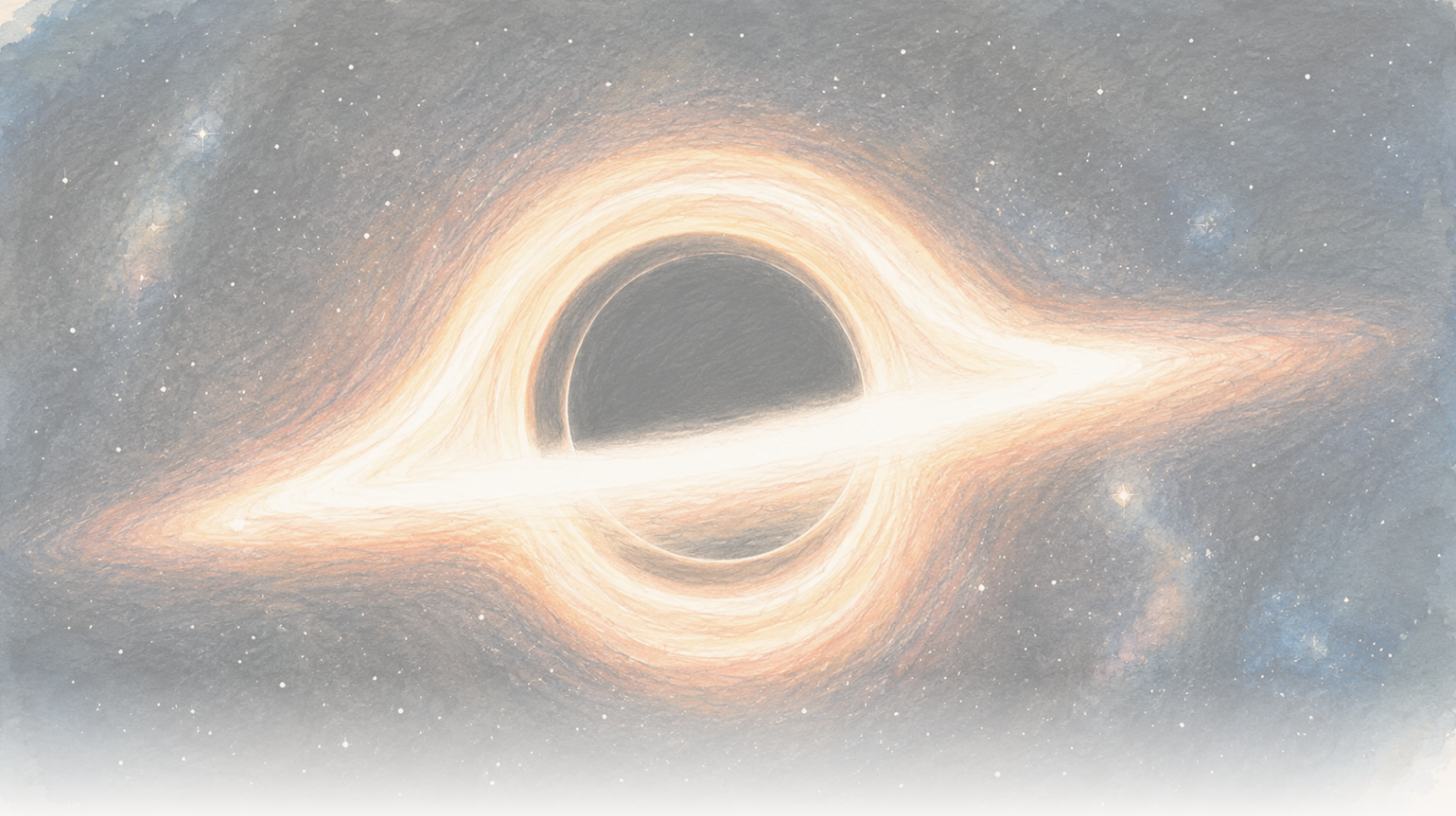




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Swart gate gehoorsaam termodinamiese ‘wette’—’n nuwe resultaat brei dit uit na swart gate wat gewelddadig buite ewewig is

Sedert die 1970’s is bekend dat swart gate wette gehoorsaam wat termodinamika weerspieël, maar die netjiese weergawe het slegs gegeld vir swart gate wat rustig in ewewig sit. ’n Nuwe Physical Review Letters-artikel brei die eerste en tweede wette uit na swart gate wat vinnig verander—materie insluk, saamsmelt, uitstraal—deur plaaslik gedefinieerde ‘dinamiese horisonne’ te gebruik. Dit laat fisici selfs aan ’n gewelddadig ontwikkelende swart gat ’n temperatuur en entropie toeken. Dit is ’n wiskundige resultaat in klassieke algemene relatiwiteit, nie nuwe kwantumswaartekrag nie, nie ’n waarneming nie en nie ’n oplossing vir die swartgatinligtingsraaisel nie.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, Physical Review Letters 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

Swart gate het “wette” wat soos termodinamika lyk. Die netjiese weergawe het slegs gewerk wanneer niks gebeur het nie.

Een van die vreemdste feite in fisika is dat swart gate soos warm voorwerpe optree. In die vroeë 1970's het Bekenstein en Hawking opgemerk dat die vergelykings wat swart gate beheer term vir term met die wette van termodinamika ooreenstem: 'n swart gat het 'n entropie wat eweredig aan die oppervlakte van sy horison is, en 'n temperatuur wat eweredig aan sy oppervlakgravitasie is. Hawking het daarna getoon dat die temperatuur in die diepste sin werklik is—'n swart gat gloei werklik, baie flou, met termiese straling.

Wat is Hawkingstraling?

Klassiek ontsnap niks uit 'n swart gat nie, dus behoort dit volkome swart te wees en geen temperatuur te hê nie. In 1974 het Stephen Hawking getoon dat dit verander wanneer kwantumteorie naby die horison in ag geneem word: 'n swart gat straal 'n flou termiese gloed uit en verloor daarom stadig massa, of “verdamp”. Die spektrum is termies by die Hawkingtemperatuur, terwyl voortplanting deur gekromde ruimtetyd die straling verander wat oneindig ver bereik. In 'n algemene heuristiese prentjie—nie Hawking se werklike afleiding nie—skep kwantumfluktuasies net buite die horison pare waarvan een vennoot as straling ontsnap terwyl die ander inval.

Die sleuteleienskap is dat hierdie temperatuur *omgekeerd* eweredig aan die swart gat se massa is: hoe kleiner die gat, hoe warmer is dit. Vir enige swart gat wat 'n teleskoop kan sien, is die temperatuur fantasies laag—veel kouer as die leë ruimte rondom dit—dus is die gloed in die praktyk totaal verwaarloosbaar en is dit nog nooit direk gemeet nie. Die belang daarvan is konseptueel: Hawkingstraling verander die *analogie* tussen swartgatemeganika en termodinamika in die werklike ding. Omdat die gat werklik 'n temperatuur het, is die “temperatuur” en “entropie” in hierdie wette werklike termodinamiese groothede, nie 'n formele toevalligheid nie. (Dit is agtergrond vir die huidige artikel, nie een van sy resultate nie.)

Daardie ooreenkoms word geanker deur 'n resultaat genaamd die **eerste wet van swartgatemeganika** (Bardeen, Carter en Hawking, 1973). In woorde sê dit: as jy 'n swart gat effens van een bestendige toestand na 'n nabygeleë bestendige toestand verskuif, is die verandering in sy massa gelyk aan sy temperatuur maal die verandering in sy entropie, plus 'n term vir sy draaiing. Dit is die swartgatweergawe van “hitte in is gelyk aan temperatuur maal verandering in entropie”.

Daar is 'n vangplek in die frase *nabygeleë bestendige toestand*. Die netjiese wet van 1973 vergelyk twee swart gate wat rustig in ewewig sit en slegs infinitesimaal verskil. Dit beskryf nooit werklik 'n **proses** nie—'n swart gat wat 'n ster insluk, twee swart gate wat saamsmelt, 'n pasgebore gat wat ná 'n gewelddadige geboorte uitlui. Dit is presies die situasies wat ons die graagste wil verstaan, en hulle is die teenoorgestelde van “rustig sit”. Die netjiese wet raak stil juis wanneer die swart gat interessant word.

Waarom die ooglopende oplossing nie werk nie

'n Mens kan dink die oplossing is maklik: kyk net hoe die horison groei terwyl materie inval. Die probleem is *watter* horison.

Die horison wat die meeste mense voorstel—die **gebeurtenishorison**, die ware punt van geen terugkeer—het 'n subtile en ongemaklike eienskap: dit word deur die hele toekoms van die heelal gedefinieer. Om te weet waar die gebeurtenishorison *nou* is, sou jy alles moes weet wat ooit, vir altyd, in die gat sal val. Dit is nie 'n tegniese besonderheid nie. 'n Gebeurtenishorison kan in 'n volkome leë, plat gebied van die ruimte begin groei *voordat* die materie wat dit sal voed aangekom het, bloot omdat daardie materie bestem is om later aan te kom. Sy oppervlakte kan toeneem waar plaaslik glad niks gebeur nie.

Hoe kan 'n horison groei voordat die materie aankom?

Die wetenskaplike naam vir hierdie raaisel is die **teleologiese aard van die gebeurtenishorison**, ook sy **globale definisie** genoem. Hier beteken “teleologies” nie dat die horison 'n doel het, die toekoms voorspel of 'n invloed agteruit deur tyd stuur nie. Dit beteken dat slegs uit die volledige toekomstige geskiedenis van ruimtetyd beslis kan word of 'n gebeurtenis binne die horison val.

Die formele definisie sê dieselfde meer kompak. Stel jou **toekomstige nul-oneindigheid** voor—“ $\mathcal{I}^+$ ” genoem en as $\mathcal{I}^+$ geskryf—as die bestemming wat bereik word deur lig wat vir altyd na 'n andersins leë, oneindig verre toekoms ontsnap. Die gebeurtenishorison is die grens tussen gebeurtenisse waarvandaan 'n uitwaartse ligsein uiteindelik daardie bestemming kan bereik en gebeurtenisse waarvandaan geen sein ooit kan nie. In die standaardnotasie van algemene relatiwiteit is dit die grens van die kousale verlede van toekomstige nul-oneindigheid: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Omdat die woord *ooit* in daardie definisie ingebou is, kan geen meting wat slegs hier en nou gemaak word die gebeurtenishorison presies lokaliseer nie.

'n Ineenstortende sferiese dop maak die vreemdheid sigbaar. Voordat die dop aankom, kan die streek binne-in leeg en plaaslik plat wees. Stuur uitwaartse ligstrale op opeenvolgend later tye uit die middelpunt: die vroeëre strale ontsnap, terwyl die latere die ineenstortende dop ontmoet in 'n geometrie waaruit hulle nie kan uitkom nie. Die gebeurtenishorison is die grens wat hierdie twee uitkomste skei. Agteruit gevolg begin daardie grens by die middelpunt en brei deur die steeds leë, plat binneste uit voordat die dop dit bereik. Sy groeiende oppervlakte rapporteer geen plaaslike vloei van materie daar nie; dit teken aan watter ontsnaproetes in die voltooië ruimtetyd oop bly.

Niks in hierdie prentjie werk agteruit in tyd nie. As die dop weggelei word en geen swart gat vorm nie, sou die voltooië ruimtetyd anders wees en daardie vroeëre streek sou nie deel van 'n gebeurtenishorison gewees het nie. Die les is nie dat die toekoms die verlede verander nie, maar dat 'n gebeurtenishorison 'n **globale kousale grens** is, nie 'n oppervlak wat 'n nabygeleë waarnemer op een oomblik kan opspoor nie. Dit is presies waarom fisici kwasi-plaaslike of dinamiese horisone gebruik wanneer hulle 'n swart gat wil volg soos dit verander.

Dit maak die gebeurtenishorison nutteloos as 'n lopende verslag van 'n swart gat se “toestand”. Jy kan

dit nie eens in 'n rekenaarsimulasie lokaliseer voordat die simulasie verby is nie, en jy kan dit beslis nie gebruik om 'n temperatuur of entropie oomblik vir oomblik te volg nie.

Die skuif: 'n horison wat plaaslik gedefinieer kan word

Die nuwe artikel, deur Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo en Jonathan Shu, bou sy resultaat op 'n ander begrip van 'n horison—'n **kwasi-plaaslike** een, wat slegs deur die geometrie in sy eie omgewing gedefinieer word, sonder verwysing na die oneindige toekoms. Hierdie “dinamiese horisonsegmente” is die oppervlaktes wat numeriese relatiwiste reeds gebruik om swart gate in saamsmeltingsimulasies te vind, presies omdat hulle plaaslik en eerlik is: hul oppervlakte groei slegs waar energie werklik oor hulle vloei.

Daarby los die outeurs die moeiliker helfte van die probleem op. In gewone termodinamika is 'n stelsel ver van ewewig berug glibberig: jy kan nie netjies 'n enkele temperatuur of druk daaraan toeken nie, omdat daardie groothede eers gedefinieer is wanneer dinge tot rus gekom het. Swart gate het dieselfde probleem—totdat, toon die outeurs, 'n spesiale eienskap van algemene relatiwiteit gebruik word. 'n Swart gat *in* ewewig ('n Kerr-swartgat) word deur slegs twee getalle vasgelê: sy grootte en sy draaiing. Die outeurs bou dus 'n afbeelding wat enige wild ontwikkelende, nie-ewewigshorison neem en op elke oomblik die twee getalle aflees van die ewewigswartgat waarop dit op daardie oomblik lyk. Deur daardie afbeelding kan selfs 'n gewelddadig veranderende swart gat 'n **tydafhanklike temperatuur en draaiing** kry.

Met hierdie komponente—'n plaaslik gedefinieerde energie wat oor die horison vloei, en oombliklike intensiewe groothede—brei hulle die eerste wet uit na swart gate arbitrêr ver van ewewig. Belangrik: die nuwe wet beskryf **eindige veranderinge wat deur werklike fisiese prosesse veroorsaak word** (materie en gravitasiegolwe wat die horison oorsteek), nie infinitesimale stappe tussen twee bevrore toestande nie. Hulle koppel dit aan 'n ooreenstemmende tweede wet waarvan die stelling nou *kwantitatief* is: die horisonoppervlakte groei met 'n hoeveelheid wat direk aan die energie wat ingevloei het gekoppel is. Saam wys die eerste en tweede wette na een duidelike gevolgtrekking—selfs vir 'n swart gat midde-in die gewelddadigste denkbare gebeurtenis bly die regte maatstaf van entropie die oppervlakte van sy horison.

Wat dit *nie* bewys nie

- Dit los **nie** kwantumswaartekrag op nie. Dit is 'n resultaat in *klassieke* algemene relatiwiteit, met die standaardidentifikasie van horisonoppervlakte met entropie. Dit lei daardie entropie nie uit iets meer fundamenteels af nie.
- Dit tel **nie** mikrotoestande of verduidelik *waaruit* 'n swart gat se entropie gemaak is nie. Dit brei die formele raamwerk van swartgattermodinamika uit; dit maak nie die boks oop en onthul die mikroskopiese vryheidsgrade nie.
- Dit los **nie** die swartgatinligtingsparadoks op nie. Daardie raaisel leef in die kwantumteorie; hi-

erdie artikel raak dit nie.

- Dit is **nie** 'n waarneming of meting nie. Geen teleskoop, geen data, geen gravitasiegolfsein is betrokke nie—dit is wiskunde. Die “temperatuur” van 'n saamsmeltende swart gat is hier 'n presies gedefinieerde grootheid in die vergelykings, nie iets wat jy van 'n termometer kan aflees nie.
- Dit keer Bekenstein en Hawking **nie** omver nie. Dit *brei* hul prentjie uit na die dinamiese regime waar die oorspronklike, slegs-ewewigswet niks te sê gehad het nie.

Hoe sterk is die bewys?

Sterk, vir wat dit is: 'n noukeurige, intern konsekwente stuk wiskundige fisika van 'n vooraanstaande groep in die veld, gepubliseer as 'n *Editors' Suggestion* in *Physical Review Letters* ('n begeleidende artikel werk die langer afleidings uit).

Die eerlike voorbehoude gaan oor *soort*, nie gehalte nie:

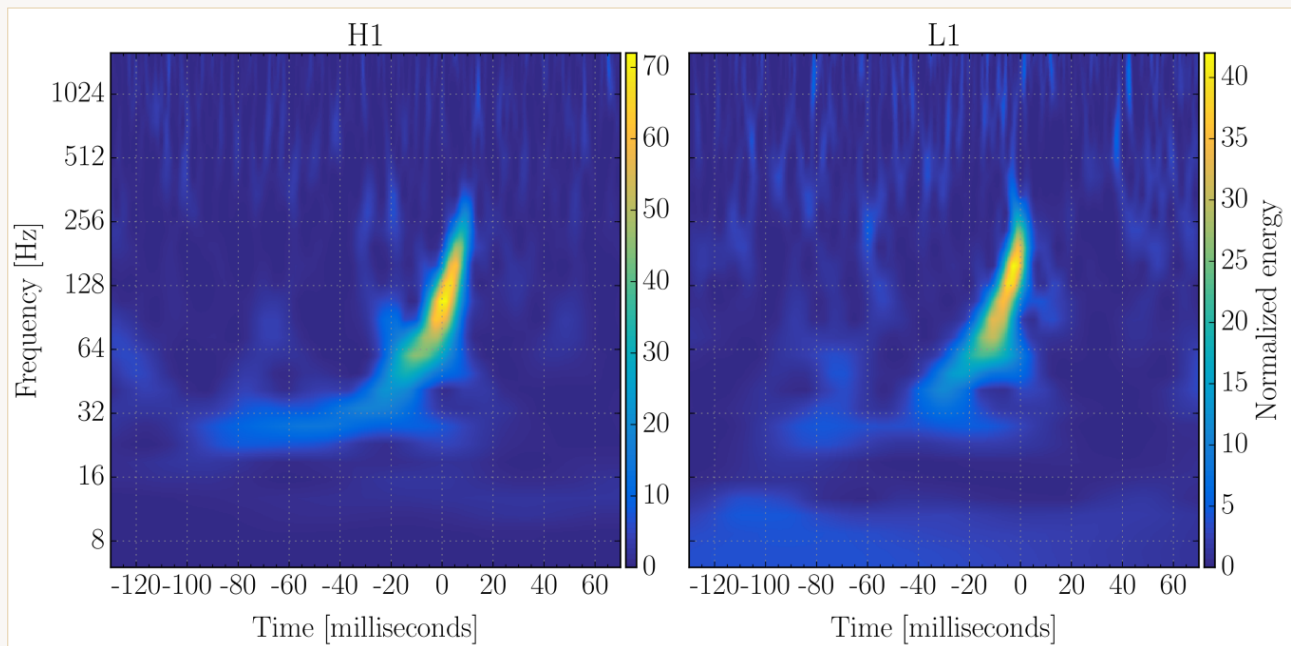
- Dit berus op die konvensionele aanname dat horisonoppervlakte *entropie is* (oppervlakte gedeel deur vier maal Newton se konstante en Planck se konstante). As daardie identifikasie ooit deur 'n volledige kwantumteorie van swaartekrag hersien word, sal die interpretasie daarmee saam beweeg.
- Die hoofberekeninge word vir die algemeenste geval uitgewerk (ruimteagtige dinamiese horisonne, aksiaal simmetries); die outeurs voer aan dat die beperkings nie noodsaaklik is nie, maar die volledig algemene stelling steun op resultate elders.
- “Entropie is gelyk aan horisonoppervlakte, selfs buite ewewig” is 'n oortuigende *identifikasie* wat deur die nuwe eerste en tweede wette natuurlik gemaak word—nie 'n stelling wat uit mikroskopiese statistiek bewys is nie.

Dus: 'n streng uitbreiding van 'n vyftig jaar oue raamwerk, nie 'n eksperimentele ontdekking of 'n nuwe natuurwet wat wag om getoets te word nie.

Waarom dit saak maak

Twee redes, een prakties en een konseptueel.

Prakties bring die swart gate wat ons nou werklik bestudeer—dié wat LIGO en Virgo hoor saamsmelt—hul belangrikste oomblikke ver van ewewig deur. Die groothede in hierdie artikel word uit dieselfde plaaslik gedefinieerde horisonne gebou wat simulاسies reeds volg, dus gee dit 'n beginselvaste manier om oor die entropie en temperatuur van 'n swart gat *tydens* 'n saamsmelting of ineenstorting te praat, nie net vóór en daarna nie.



GW150914, die eerste direk opgespoorde gravitasiegolfsein, het van twee swart gate wat saamsmelt gekom. Hierdie tyd-frekwensiekaarte toon die sein in LIGO Hanford (links) en LIGO Livingston (regs): in albei detektors swaai die helder spoor opwaarts namate die sein se frekwensie na die saamsmelting styg. Dit is 'n werklike voorbeeld van 'n swartgatstelsel ver van ewewig; dit is konteks vir die nuwe termodinamiese raamwerk, nie waarnemingsbewys daarvoor nie.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

Konseptueel is die termodinamiese gedrag van swart gate een van die min konkrete leidrade wat ons oor kwantumswaartekrag het—dit is waar swaartekrag, kwantumteorie en termodinamika sigbaar ontmoet. Om presies te verskerp wat “entropie” en “temperatuur” vir 'n gewelddadig veranderende swart gat beteken, verfyn die teiken wat enige toekomstige kwantumteorie moet tref. Dit beantwoord nie die diep vraag waaruit 'n swart gat se entropie werklik bestaan nie. Dit stel die vraag meer presies—wat in hierdie hoek van fisika die meeste van die werk is.

Kortliks

Swart gate gehoorsaam wette wat termodinamika weerspieël, maar die netjiese “eerste wet” van 1973 het slegs swart gate vergelyk wat stil in ewewig sit en kon nie 'n werklike proses beskryf nie. Ashtekar, Paraizo en Shu brei beide die eerste en tweede wette uit na swart gate arbitrêr ver van ewewig—wat saamsmelt, voed of uitlui—deur plaaslik gedefinieerde “dinamiese horisonne” en 'n afbeelding te gebruik wat 'n veranderende swart gat 'n oombliklike temperatuur en draaiing toeken. Die gevolg is dat horisonoppervlakte selfs tydens gewelddadige gebeurtenisse die regte maatstaf van entropie bly. Dit is 'n streng resultaat in klassieke algemene relatiwiteit, nie kwantumswaartekrag nie, nie 'n waarneming nie, nie 'n telling van mikrotoestande nie en nie 'n oplossing vir die inligtingsparadoks nie.

Nugtere beoordeling

Wat die artikel toon: 'n Wiskundig konsekwente uitbreiding van die eerste en tweede wette van swartgatmeganika na volledig dinamiese swart gate ver van ewewig, gebou op kwasi-plaaslike dinamiese horisonne. Dit definieer 'n eindige, prosesgebaseerde eerste wet en 'n kwantitatiewe tweede wet, en maak dit natuurlik om 'n dinamiese swart gat se entropie met sy horisonoppervlakte te identifiseer.

Wat eg maar interpretatief is: Die identifikasie “entropie = horisonoppervlakte” buite ewewig. Dit word deur die nuwe wette oortuigend gemaak, maar erf die standaard klassieke oppervlakte-entropie-aanname eerder as om dit af te lei.

Wat dit nie toon nie: 'n Kwantumteorie van swaartekrag; 'n mikroskopiese oorsprong of “telling” van swartgatenentropie; 'n oplossing vir die inligtingsparadoks; enige waarnemings- of eksperimentele resultaat; 'n temperatuur wat fisies gemeet kan word.

Belangrikste beperkings: Deurgaans klassieke algemene relatiwiteit; hoofresultate bewys vir die algemene ruimteagtige, aksiaal simmetriese geval met algemeenheid wat via begeleidende werk aangevoer word; die oppervlakte-entropie-identifikasie word aanvaar, nie uit statistiese meganika bewys nie.

Hoeveel vertroue behoort 'n algemene leser te hê? Hoë vertroue dat dit 'n stewige, hoog aangeskrewe teoretiese vooruitgang is wat swartgattermodinamika werklik na die dinamiese regime uitbrei. Ewe hoë vertroue dat dit *nie* 'n bewering oor nuwe waarnemings, nie kwantumswaartekrag en nie 'n oplossing vir die beroemde inligtingsraaisel is nie. Die regte houding: 'n werklike stap in begrip, met kryt geneem en nie met 'n teleskoop nie.

Bronne

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)

<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>